

# マグネシウム合金板材の塑性変形の向上とプレス成形特性に関する研究

小松崎 和久\* 行武 栄太郎\*

## 1. はじめに

近年、マグネシウム合金が輸送機器部品、情報携帯端末部品など、特に軽量化が必要な部材への適用が拡大されている。しかし、その多くはダイカストをはじめとする鑄造品であり、展伸材を用いた生産性の高いプレス成形品はまだ少ない。これは、室温でのプレス成形が著しく劣るためであり、素材単価も他軽金属の展伸材と比べて高い。そこで、連続鑄造圧延法による展伸材の開発による板材の低コスト化が図られているが、その成形性に関するデータは不足している。

また、マグネシウム合金種別では、AZ31 合金の成形性報告に比べ、AZ61 合金の成形性に関する報告は少ない。

本研究では、連続鑄造圧延法で製造された AZ61 合金圧延市販材の常温から高温域における機械的性質および成形性を評価した。また、現在 PC カバー等のプレス製品へ利用されている AZ31 合金圧延板を用いてプレス成形性に影響を及ぼす底面集合組織の観察と成形温度が結晶粒微細化に及ぼす影響を調査し、成形性向上を図るため底面集合組織ランダム化を効率的に実現させる連続曲げ装置を開発し、制御した組織観察を行った。

## 2. 連続鑄造マグネシウム圧延材のプレス成形性

### 2.1 実験方法

成形性の評価にはアマダ製 1100kN サーボプレス機を用い、温間深絞り試験を行った。

図 1 に温間深絞り金型の概略図を示す。独立した上部のダイと下部ダイ(ホルダー)の間に試験片を挟み、ブランク材を一定の空気圧で固定した。ダイ穴径は  $\phi 51.6\text{mm}$ 、パンチは  $\phi 50\text{mm}$  肩部 R4 の円筒平底パンチである。ダイは、サーボプレス機のスライド下面に取付け、パンチを含む下部金型はボルスタターに固定される。試験温度は、ダイおよびブランクホルダー内部に設置したカートリッジヒーターで加熱し、熱電対にて測温した。ブランクは所定の温度となったダイとブランクホルダーで 20sec 挟み込んで加熱した。パンチは約 283K に冷却している。

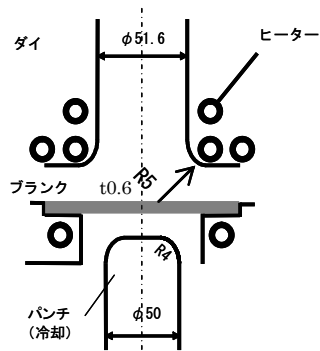


図 1 深絞り金型の構

に示す。

表 1 供試材の化学組成(mass%)

|      | Al   | Zn   | Mn  | Si   | Fe    | Mg  |
|------|------|------|-----|------|-------|-----|
| AZ61 | 5.44 | 0.98 | 0.2 | 0.03 | 0.005 | Bal |

図 2 に光学顕微鏡による組織観察写真を示す。平均粒径約  $20\mu\text{m}$  の等軸の完全に焼なましされた結晶粒が観察された。

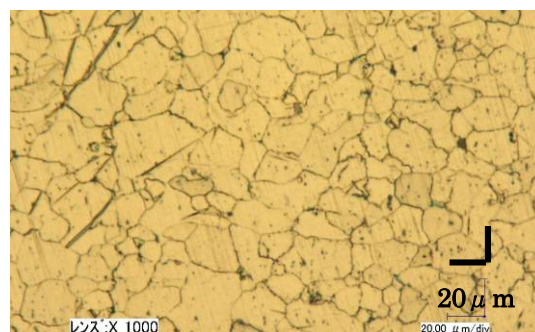


図 2 AZ61 合金の結晶組織

機械的性質評価として圧延方向に対し  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  方向の試験片を採取し、常温、373K、423K、473K、523K および 573K における引張試験を行った。引張速度は  $3\text{mm}/\text{min}$  とし、引張強さおよび伸びを 3 回の平均値として求めた。

成形性試験は温度を引張試験と同一条件、ダイスの移動速度を  $10\text{mm}/\text{min}$  として前述の深絞り試験を行った。ブランク材とパンチおよびダイ間の潤滑にはテフロンシート(厚さ:  $0.1\text{mm}$ )を用いた。以上の方法により各試験温度での限界絞り比 LDR (Limiting Drawing Ratio) を求めた。なお、各試験温度で 3 回以上カップ部が破断することなく、また、壁部にしわが発生することなく絞りが可能な最大ブランク径から LDR を求めた。LDR を得たカップにおいてカップ底の中心から壁部上端までの板厚方向のひずみを  $2\text{mm}$  間隔で測定した。ひずみの測定にはポイントマイクロメーターを用いた。

### 2.2 実験結果及び考察

#### 2.2.1 引張特性

図 3、4 に各試験温度における引張強さ、伸びを示す。供試材の引張強さは高温になるほど低下し、伸びは増大する。引張方向による引張強さおよび伸びの差はほとんどみられなかった。573K において引張強さは約  $100\text{MPa}$  まで低下した。また、高温域 ( $423\text{K}$  以上) ではほとんど加工硬化しないことが確認された。これは、 $423\text{K}$  付近で回復および再結晶が始まり、ひずみによる加工硬化の影響が低下するためである。

伸びは、573K では約 100% を示し常温の約 6 倍となった。 $423\text{K}$  から  $473\text{K}$  にかけて伸びが低下しているが、

これは再結晶開始温度付近であり、結晶の状態が不安定となり、また加工硬化が期待できないことが起因していると思われる

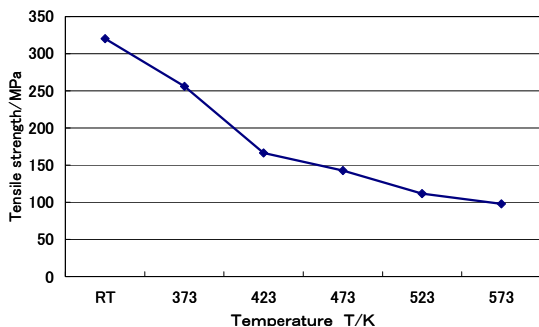


図 3 AZ61 合金の引張強さと温度の関係

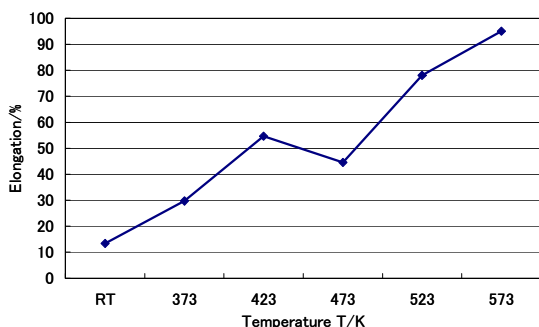


図 4 AZ61 合金の伸びと温度の関係

### 2.2.2 プレス成形性

図 5 に常温、373K、423K、473K、523K および 573K での LDR を示す。常温での最大ブランク径は約  $\phi 60\text{mm}$  であり LDR1.3 を示すが、473K 以上では  $\phi 120$  以上 LDR2.4 以上を示した。なお、試験機の構造上  $\phi 130$  以上のブランクではフランジ部が残ってしまい絞りきることはできなかった。常温、373K では最大ブランク径を超えると、カップの縁に大きなしわが発生しパンチ肩部からフランジ部へ大きな割れが発生し、圧延方向に沿った縦割れが確認された。473K、523K、573K ではパンチ肩部で圧延方向に割れが発生した。これは、423K 以上では引張強さの低下に加え、加工硬化も低下するため、パンチ肩部での抵抗力がブランク変形抵抗力より小さくなったためである。

図 6 に各試験温度で成形性評価した後の外観写真を示す。常温、373K ではほとんど見られないが、473K 以上では圧延方向へ小さな耳の発生が観察された。これは、面内塑性異方性が小さいことを示しており、引張特性の結果と対応している。

各温度で成形性評価したカップのブランク中心から縁まで板厚ひずみは、常温、373K では、中心からパンチ肩部まで大きな変化はなく、パンチ肩部から縁につれて板厚が若干増加した。473K 以上では、パンチがブランクと接する中心からパンチ肩部にかけてほとんど変化はないが、パンチ肩部で最も減少していた。パンチ肩部から縁にかけては板厚の増加が見られ、0.2mm 以上の増加が確認された。

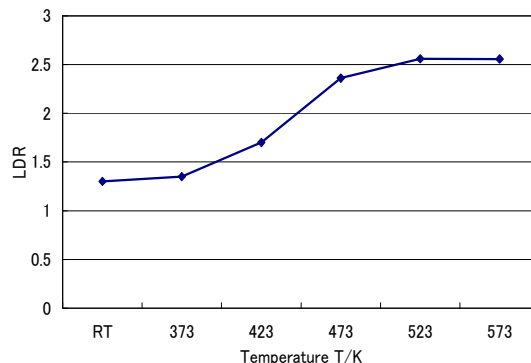


図 5 AZ61 合金の限界絞り比と温度の関係



図 6 AZ61 合金の深絞りとカップの外観 (左：373K 中央：473K 右：573K)

### 2.3 まとめ

- 1) 連続鋳造圧延マグネシウム合金板薄板材 (AZ61) の機械的性質は、試験温度の上昇とともに強度が低下し伸びが向上し 573K で引張強度 100MPa、伸び約 100%を示した。
- 2) 連続鋳造圧延マグネシウム合金板薄板材 (AZ61) の成形性は常温で LDR1.2、試験温度上昇に伴い向上し 473K 以上では LDR2.4 以上を示した。
- 3) 連続鋳造圧延マグネシウム合金薄板材 (AZ61) の特性は市販されている AZ31 圧延薄板材と同等がそれ以上であり今後各製品への展開が期待される。

### 3. 連続曲げによる組織制御

#### 3.1 マグネシウムの結晶構造と連続曲げ装置

最密六方格子の特徴として、結晶の c 軸方向に引張および圧縮ひずみを加えると機械的雙晶変形が発現する。マグネシウムの結晶は軸比 (c/a) が 1.633 以下であるため c 軸方向に引張ひずみを加えることで機械的雙晶変形が生じる。双晶を積極的に発生させることで常温でのすべり面 {0001} を回転させ、板面に平行に配列した底面集合組織をランダム化することで、すべり面が板面方向だけでなく板厚方向にも向くため、絞り、張出加工のようなプレス成形性の成形限界の向上が期待できる。そこで、曲げ変形付与し板内側に発生する圧縮変形、外側に発生する引張変形を利用し、機械的雙晶変形を板内に発現させることを試みた。

図 7 に連続曲げ装置の外観写真を示す。連続曲げ装置では 3 本のステンレスロール ( $\phi 38$ ) を用い、連続的に板材に曲げ変形を加え、板厚変化がほとんどなく板全面にひずみを加えることができる。ロール間隔を



変えることで曲げ角度 (60° , 90° , 120° ) を調整し、双晶の発生量を変化させる。また、温間域での曲げ変形による微細化を期待し、ロールを電気炉で覆う構造とした。ロール送り速度は 10~1000mm/min の範囲で制御できる。電気炉の温度範囲は常温から 673K である。装置に挿入された板材は常にバックラッチによりテンションがかけられる。曲げロールは一直線状に 4 基配置しその内 2 基には電気炉を配置してある。

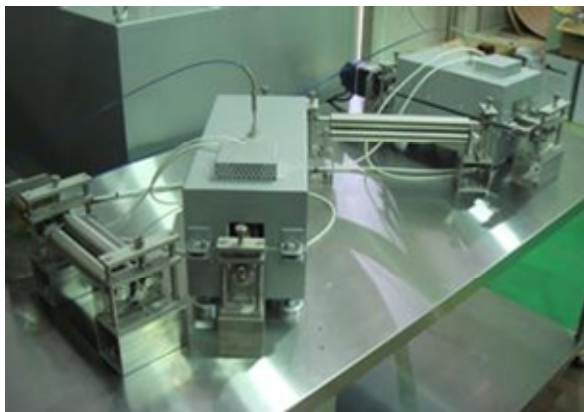


図 7 連続曲げ装置の外観

### 3.2 実験方法

供試材には、市販の AZ31 合金 (完全焼き鈍し材 板厚 : 0.6mm, 日本金属株式会社製) を用いた。供試材については、常温から 573K において機械的性質および集合組織観察を行った。引張速度は 5mm/min, 試験温度は常温, 373K, 423K, 473K, 523K, 573K とした。試験片寸法は、評点間距離 50mm, 幅 12.5mm とした。引張試験後、破断部近傍の組織観察, 集合組織観察を行った。以上の予備実験より、連続曲げ試験条件として送り速度を 300mm/min, 試験温度を常温, 423K, 523K とした。連続的に組織制御を行うため、第 1 ロールでは常温で曲げ変形, 第 2 ロールで温間曲げ変形, 第 3 ロールで再度常温曲げ変形, 第 4 ロールで温間曲げ変形を付与した。試験後、得られた供試材の結晶組織および集合組織を調べた。

### 3.3 結果及び考察

#### 3.3.1 引張試験における機械的性質と組織観察)

連続曲げ試験を行う前に引張試験にて検証を行った。購入時における AZ31 合金の平均粒径は約 17 $\mu$ m で、完全に再結晶した結晶粒が観察された。表面の平均硬さは約 55HV であった。集合組織の観察結果、圧延方向に若干の傾きを示すものの {0001} 面が板面に平行に並んだ強い底面集合組織が観察された。引張強さは常温で約 280MPa, 伸びは約 18% であった。試験温度が上昇するにつれ、引張強さは低下し、伸びは上昇した。423K 以上では加工硬化が小さくなり、引張強さが大きく低下した。これは、423K 付近で回復および再結晶が始まることを示唆している。引張試験後、破断部近傍を光学顕微鏡で観察したところ、423K~473K で再結晶の発生が観察された。これは、473K 付近での加工硬化の低下と一致しており、引張強さも低下している。ま

た、引張変形中の再結晶により発現した結晶粒であるが、523K では微細・等軸状で観察された。573K では、約 10 $\mu$ m に再結晶粒が成長していた。このことは、473~523K 付近で引張変形させ、ひずみを加えることで微細・等軸状の結晶粒を有する板材作製が可能であることを示唆する。423K 付近では双晶が観察され、温間においても双晶変形が発生することが確認された。

すべり面と平行に引張変形を加えることで、強い底面集合組織が弱化されランダム化される傾向が観察された。これは、温間変形時に結晶粒が回転したことで底面の方位が傾いたためと思われるが、更なる検討が必要である。

#### 3.3.2 連続曲げ試験

図 8 に連続曲げ試験後の板表面の組織観察写真を示す。常温で曲げ変形を付与した際、変形内側表面に多くの機械的双晶が確認され、変形外側表面の双晶は内側と比べ少なかった。板全面を観察すると、双晶が板幅方向に直線状に均一に発生していることが確認された。これは、連続曲げ変形により曲げ内側に板面と平行に生じた圧縮変形により、板厚方向に引張ひずみが加えられたことを示している。ロールの送り速度を変化させたが、大きな組織の変化は確認されなかった。常温での曲げ試験後、熱処理を行った。熱処理温度 423K では組織の大きな変化は観察されなかったが、523K では、再結晶組織が部分的に観察された。573K では、完全に再結晶した等軸の結晶粒が観察された。これは、473K 以上で行った引張試験片の結晶組織と同様であり、温間で曲げ変形をすることで引張変形と同様な結晶組織を得ることが可能である。

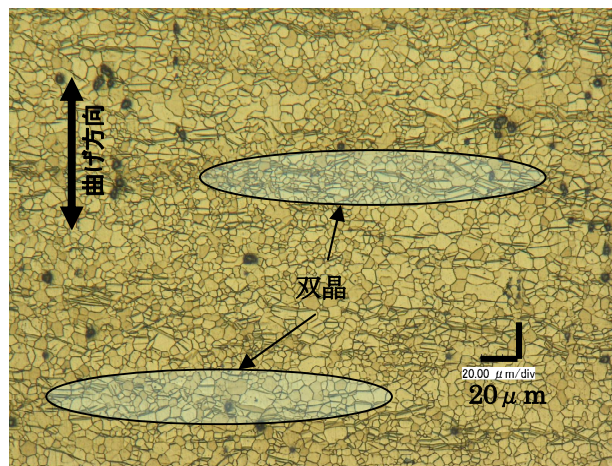


図 8 連続曲げ試験後の板表面の組織写真

図 9 に連続曲げ試験前後の底面集合組織 {0001} の集積度を示す。曲げ試験後、高角度のピーク集積度が低下することが観察された。曲げ試験後、低角度側ピークが増加したが、高角度側ほど大きな変化は観察されなかったことから、連続曲げ変形を施すことで底面集合組織が弱められ (ランダム化され) , より低い温間域でのプレス成形性の向上が期待できる。

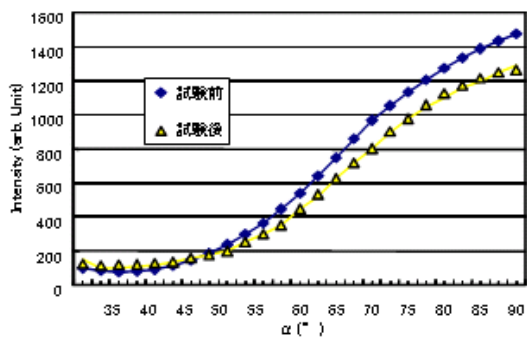


図9 連続曲げ試験前後の底面集合組織 {0001}の集積度

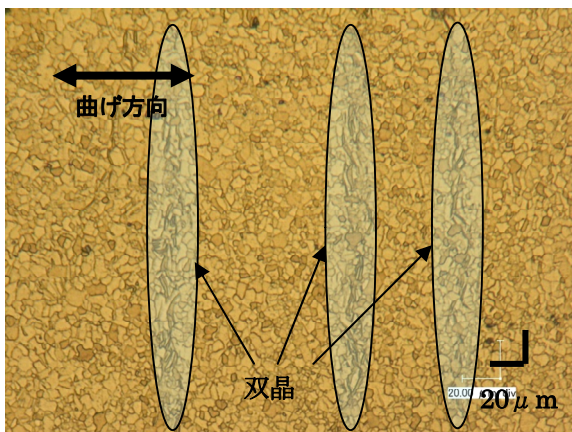


図10 温間連続曲げ試験後の組織観察写真

図10に温間連続曲げ試験後の組織観察写真を示す。523Kで曲げ変形を行った後、双晶のない約5μmと微細で等軸の結晶組織が確認され、523Kで引張変形した場合と同様な微細組織であった。423Kで曲げ試験をした場合、引張の場合と比べ、多くの双晶が観察された。この結果、温間連続曲げ変形付与により、微細結晶粒組織を有する底面集合組織が弱化された素材の作製が期待でき、より低い温間域において良好な成形性をもつマグネシウム圧延薄板材の作製が可能となる。

### 3.3 まとめ

- ・AZ31-0 圧延薄板材に 473K 付近で引張ひずみを負荷することで微細結晶組織が発現した。
- ・連続曲げ変形により底面集合組織の集積度が低下した。
- ・温間連続曲げ変形(523K)により等軸で約5μmの微細結晶粒径が得られた。
- ・連続曲げ変形を付与することで機械的双晶が発生し集合組織のランダム化によるより低い温間域でのプレス成形向上が期待できる。

### 4. 総括

機能性向上及び低コスト化を目指し製造されている連続鋳造マグネシウム圧延薄板材(AZ61)の性能は、現在市販されているマグネシウム圧延材(AZ31)と比べ同等の成形性を示す。また、連続曲げ装置により組織のランダム化が図られ、常温での成形性向上が期待でき

る。

各種マグネシウム合金圧延材の基礎データ（機械的性質、成形性、疲労特性、耐食性等）の蓄積を進めることで、展伸材用途開発、特にプレス製品への展開が活性化し家電製品さらには自動車部品へと市場拡大を期待できる。